

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРИБОРА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ И УРОВНЯ

Жиганов И.Ю., Скворцов Б.В., Афанасьев А.А.

Электронно-акустические приборы применяются при измерении длины труб, уровня жидкости, измерении расстояния до препятствия [1]. Авторами создан портативный переносный прибор для измерения длины и уровня «ПИТОН-12», основанный на фиксации времени прохождения измеряемого расстояния прямым и отраженным от конца (препятствия) акустическим импульсом. Схема (рис.1) и идеология построения и использования этого прибора такова, что перед началом измерений прибор калибруется на трубе с известными длиной и диаметром при текущих климатических условиях. Коэффициент калибровки запоминается в ПЗУ микроЭВМ в виде реальной скорости распространения акустического сигнала  $c$ , а измеряемая длина определяется по формуле:

$$L = cT/2, \quad (1)$$

где  $c$  - скорость звука в трубе,  $T$  - время распространения акустического импульса в прямом и обратном направлениях.

За счет этого достигнута абсолютная погрешность  $\pm 1$  см при измерениях реальных значений длины, отклоняющихся от калибровочного значения на величину не более  $\pm 0,5$  м и неизменных климатических условиях. Это достаточно много при использовании прибора для коммерческих измерений в процессе отгрузки труб или отпуска из емкостей жидких продуктов. Экспериментальные исследования и опыт эксплуатации показали, что при калибровке прибора на известной длине при одном и том же диаметре трубы погрешность носит систематический характер при измерении длин (уровней) меньших или больших точки калибровки. Это может быть учтено в процессе обработки и индикации результатов, что обеспечит значительное повышение точности прибора. Для исследования этого вопроса был создан специальный стенд и разработана программа испытаний, сущность которой состоит в следующем.

На трубе длиной 14 метров через фиксированные расстояния были сделаны прорезы для установки отражателя (пластинки). Прибор калибровался сначала на длине 2 м, затем проводились измерения расстояний от 2 м до 14 м, через интервал 10 см. Затем прибор калибровался на длине 7 м и проводились измерения длины в большую и меньшую стороны от калибровочного значения. После этого прибор калибровался на длине 14 м и проводились измерения расстояний от 14 м до 2 м. (в меньшую сторону от калибровочного значения). Во всех трех случаях вычислялись абсолютная  $\Delta$  и относительная  $\varepsilon$  погрешности измерений по формулам:

$$\Delta = L_0 - L, \quad \varepsilon = \Delta/L_0, \quad \text{где } L_0, L - \text{истинное и измеренное значения длин}$$

ны. Графики изменения абсолютной погрешности показаны на рис.1. Из графиков видно, что при измерении длины большей калибровочного значения погрешность изменялась в отрицательную сторону (прибор показывал больше истинного значения). При измерении длины меньшей калибровочного значения прибор показывал меньше истинного значения (погрешность изменялась в положительную сторону). Исследования проводились для четырех приборов, при этом показанные на рис.1 закономерности четко повторялись. Таким образом, погрешности, связанные с измерением расстояний больших или меньших калибровочного значения носят систематический характер, поэтому могут учитываться при разработке алгоритма функционирования прибора путем введения поправки при вычислении длины. В этом случае определяемую длину следует вычислять по формуле:

$$L_1 = \frac{cT}{2} + \Delta_K(L), \quad (2)$$

где  $\Delta_K(L)$  – функция, связывающая абсолютную погрешность измерений с измеряемой длиной относительно точки калибровки.

Регрессионный анализ кривых, показанных на рис.1 с погрешностью, не превышающей 0,1%, дает следующие выражения для поправочной функции:

1. При калибровке на длине 2 м

$$\Delta_2(L) = -0,002766L^2 - 0,120715L + 0,245287. \quad (3)$$

2. При калибровке на длине 7 м

$$\Delta_7(L) = -0,003408L^2 - 0,006803L + 0,208483. \quad (4)$$

3. При калибровке на длине 14 м

$$\Delta_{14}(L) = -0,002812L^2 - 0,02494L + 0,203676. \quad (5)$$

Анализ графиков показывает, что при калибровке на длинной трубе максимальная абсолютная погрешность измерений значительно меньше, чем при калибровке на короткой трубе. Поэтому идеологию построения измерительного процесса необходимо делать такой, чтобы прибор калибровался на самой длинной трубе из предполагаемого диапазона измерений, а корректирующая функция  $\Delta_K(L)$  в формуле (2) была универсальной, не зависящей от абсолютного значения точки калибровки. Для этого проведены исследования погрешностей текущих измерений в меньшую сторону от точки калибровки при калибровке на длинах 13 м, 12 м, 11 м, ... 3 м. Графики изменения погрешностей в этом случае показаны на рис.2. Анализ графиков показывает, что они являются участками одной и той же кривой, которая аппроксимируется регрессионной формулой:

$$\Delta_K(L) = -0,002812(L - 14 + L_K)^2 - 0,02494(L - 14 + L_K) + 0,203676, \quad (6)$$

где  $L_K$  длина на которой производится калибровка. При  $L_K = 14,0$  м формула (6) совпадает с формулой (3). Величина 14 м это максимальная

длина, которую может зафиксировать данный прибор. В общем случае формула, вида (6) с конкретными числовыми значениями может быть получена для любого акустического прибора конкретной конструкции с диапазоном измерения  $[L_0, L_M]$ . В общем виде формулу (6) можно записать:

$$\Delta_K(L) = \sum_{i=0}^n a_i (L - L_M + L_K)^i, \quad (7)$$

где  $L_M$  — максимальное значение диапазона преобразования,  $L_K$  — длина, на которой производится калибровка прибора,  $a_i$  — коэффициенты, получаемые в результате регрессионной аппроксимации погрешностей прибора данной конструкции. На практике в полиноме (7), как правило, достаточно трех слагаемых. Формула (7) означает, что любой электронно-акустический прибор измерения длины или уровня, созданный по схеме, показанной на рис.1, может быть откалиброван на любой длине  $L_K \leq L_M$ . При этом коэффициенты  $a_i$  можно вычислить и внести в ПЗУ микроЭВМ после стендовых испытаний один раз для всей серии приборов данной конструкции с максимальным значением диапазона измерения  $L_M$ . После калибровки прибор может использоваться для измерения длин и уровней  $L < L_K$ , определяемых данной конкретной задачей. Это позволяет адаптировать прибор под конкретный диапазон измерения, уменьшить тем самым погрешность, так как уменьшение диапазона измерения всегда приводит к уменьшению абсолютной погрешности. Например, для прибора ПИТОН-12 с максимальным диапазоном измерения  $L_M = 14$  м конкретная формула коррекции показаний имеет вид (6). При написании программы обработки для прибора необходимо предусмотреть ввод значения точки калибровки с клавиатуры. При использовании прибора для измерения уровня жидкости, затекающей в трубу, установленную в контролируемую емкость, используется одна труба постоянного диаметра. В этом случае калибровку нужно проводить на трубе используемого диаметра. Однако, при измерении длины труб на базах и разгрузочных площадках диаметры могут быть разными, поэтому необходимо исследовать влияние диаметра трубы на вид и числовые значения корректирующей формулы (7). Теоретические исследования показали, что при одной и той же длине и изменении диаметра трубы от калибровочного значения длина трубы может быть скорректирована по формуле:  $L_1 = \frac{cT}{2} K_0 = LK_0$ , (8)

$$\text{где } K_0 = \frac{1 + 0,613 \frac{d}{L_K}}{1 + 0,613 \frac{d_K}{L_K}} = \frac{L_K + 0,613d}{L_K + 0,613d_K},$$

$d_K$  — внутренний диаметр трубы, на которой производилась калибровка.



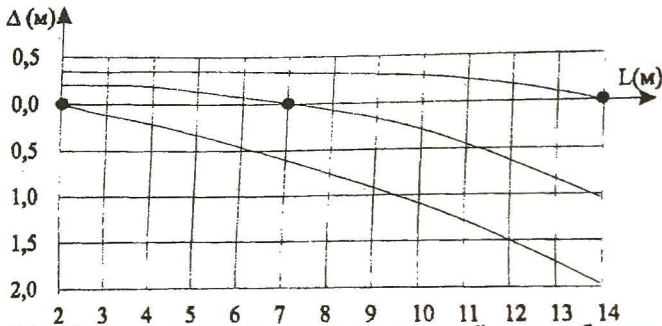


Рис.1 График изменения погрешности измерений при калибровке прибора на различных участках длины трубы :● - точка калибровки

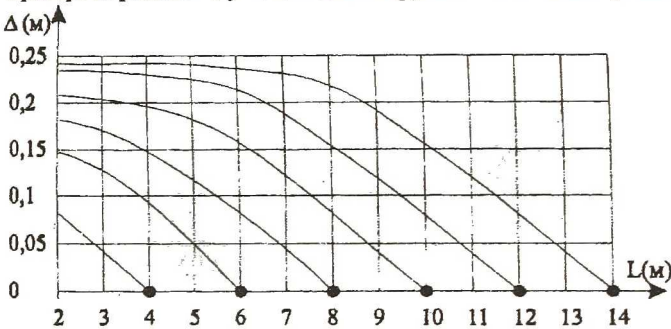


Рис.2 Графики зависимостей абсолютной погрешности показаний прибора при калибровке на различных участках трубы при измерениях длины, меньших калибровочного значения :● - точка калибровки

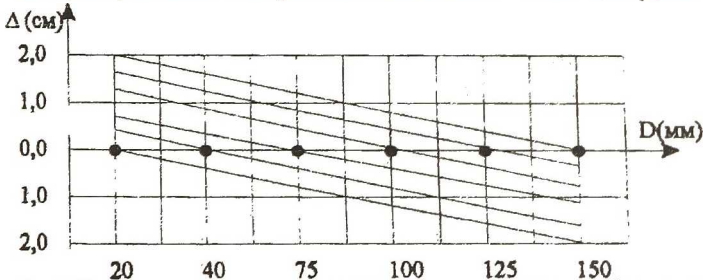


Рис.3 График изменения погрешности измерений при калибровке прибора на различных диаметрах трубы при длине 2,8 м :

● - точка калибровки

Из формулы видно, что при  $d \ll L_K$  и  $d_K \ll L_K$ ,  $L/d_K < 0,05$ , коэффициент  $K_0 = 1.0$  и показания прибора практически не зависят от диаметра трубы, что полностью подтверждается экспериментом, который проводился следующим образом. Были подготовлены шесть труб диамет-

ром 20; 40; 75; 100; 125; 150 мм одной длины 2.8 м. Прибор калибровался на трубе диаметром 20 мм и проводились измерения длин других труб. Затем прибор поочередно калибровался на трубах других диаметров и каждый раз проводились измерения их длин. График изменения погрешностей показан на рис. 4, из которого видно, что погрешности носят систематический характер. Таким образом, при измерении труб малого диаметра полученные корректирующие зависимости сохраняют свой вид и числовые значения. При измерении труб с отношением диаметра к длине,  $L/d_K < 0.05$  коррекцию показаний необходимо проводить также по ранее полученным зависимостям, но окончательный результат получать путем введения дополнительного коэффициента, который может быть вычислен из графиков, показанных на рис. 3.

На основе проведенных исследований можно сформулировать следующий общий алгоритм функционирования прибора в различных вариантах использования.

При использовании в качестве уровнемера: прибор калибруется на трубе используемого диаметра длиной соответствующей максимуму диапазона преобразования. Вычисление длины производить по формуле (2) с корректирующей формулой (6) или (7) в зависимости от требуемой точности. При использовании в качестве трубомера возможно два пути:

1. Разделение всей номенклатуры труб на типоразмеры с диапазоном изменения относительных размеров гарантирующих не превышение систематических погрешностей допустимых значений. Прибор позволяет разбить диапазон всех измеряемых труб на 20 типоразмеров.

2. Прибор калибруется на максимальной длине среднего диаметра. На клавиатуре предусматривается возможность ввода параметра относительного размера  $L/d_K$ . Далее в зависимости от этого значения выбираются формулы вычисления (2), (6) при  $L/d_K < 0.05$  или (2), (6), (8)  $L/d_K > 0.05$ .

#### Список использованных источников

1. Скворцов Б.В., Жиганов И.Ю. Электронно-акустические приборы измерения длины и расстояний с автоматическим зондированием свойств среды. // Тезисы доклада XI международной научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик – 99). Гурзуф. 1999.

УДК 519.725

## ДЕСКРИПТОРНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Широков О.Ю., Прохоров С. А., Овсянников А. С.

Цифровая обработка с использованием преобразования Фурье лежит в основе спектрального анализа дискретных потоков данных. Под дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) понимают прямое преобразование